



Département des sciences économiques/ Economics Department

Cahier de recherche/Working Paper No. 20-03

La gestion optimale d'une forêt exploitée pour son potentiel de diminution des gaz à effet de serre et son bois *

Ariste Ruolz

Université du Québec à Montréal et CIRANO

Pierre Lasserre

Université du Québec à Montréal, GREQAM et CIRANO

Février 2001

Correspondance: Lasserre, Université du Québec à Montréal, CP 8888 Succ. Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3P8, Canada. Email: lasserre.pierre@uqam.ca.

LA GESTION OPTIMALE D'UNE FORÊT EXPLOITÉE POUR SON POTENTIEL DE DIMINUTION DES GAZ À EFFET DE SERRE ET SON BOIS

ARISTE Ruolz¹ et Pierre LASSERRE ²

RÉSUMÉ - Cet article cherche à déterminer les âges optimaux de coupe d'un peuplement forestier lorsque le prix du bois suit par hypothèse un processus de mouvement brownien géométrique et l'externalité qu'engendre une forêt, par sa capacité à réduire le niveau du dioxyde de carbone de l'air et donc l'effet de serre, est adéquatement prise en compte. L'utilisation qui sera faite du bois récolté se révèle d'une certaine importance dans la prise de décision de coupe des arbres. Les résultats du modèle indiquent ce qui suit:

- 1) L'âge de coupe socialement optimal est plus élevé que l'âge optimal de coupe du point de vue d'un propriétaire privé si le carbone emmagasiné est libéré au moment de la récolte;
- 2) La rotation est plus courte si le carbone reste verrouillé lors de la coupe que dans le cas de sa libération;
- 3) L'activité forestière devient socialement plus rentable; on ne passe à l'usage alternatif que pour des valeurs élevées du terrain (consacré à un autre usage) associées à de faibles réalisations du prix du bois.

¹ Article basé sur mon mémoire de maîtrise. Département des sciences économiques, Université du Québec à Montréal / Centre Interuniversitaire de Recherche en Analyse des Organisations.

² Directeur de recherche. Département des sciences économiques, Université du Québec à Montréal / Centre Interuniversitaire de Recherche en Analyse des Organisations.

INTRODUCTION

La forêt fournit, en plus du bois, de nombreux autres services : récréation, approvisionnement de la nappe souterraine, captage du gaz carbonique, etc. Les premières études en économie forestière ignorent ces externalités et considèrent la forêt principalement pour sa production ligneuse. Ainsi, l'article séminal de Faustmann (1849) s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses très restrictives : a) la forêt est exploitée uniquement pour son bois (usage mono-extrant); b) les prix et taux d'escompte futurs sont certains et constants; c) l'exploitation forestière est la seule activité envisageable pour la terre considérée.

Certains auteurs comme Hartman, 1976; Snyder et Bhattacharyya, 1990 ont relâché l'hypothèse «usage mono-extrant» alors que d'autres tiennent compte de la variabilité du prix: Norstrom (1975); Lohmander (1987); Brazee et Mendelsohn (1988); Reed et Clarke (1990); Teeter et Caulfield (1991). Des travaux plus récents ont simultanément relâché les hypothèses a) et b), Conrad (1997) ainsi que les hypothèses b) et c), Thomson (1992) mais aucun des modèles passés en revue n'a écarté en même temps les trois hypothèses contraignantes du modèle de Faustmann. En outre, l'externalité que constitue le verrouillage du carbone a été envisagée dans certaines études mais aucune de ces dernières n'a discuté formellement de l'utilisation qui est faite du bois récolté.

Quelles sont les implications sur l'âge optimal de coupe d'incorporer simultanément une externalité positive (verrouillage du carbone par la forêt) et l'incertitude sur les prix du bois? Comment l'usage qui est fait du bois récolté influence-t-il cet âge optimal? Dans un tel

contexte, une fois les arbres coupés, est-il toujours optimal de reconduire l'activité forestière? La littérature existante ne nous permet pas de répondre à ces différentes questions. Le modèle élaboré dans ce travail apporte une réponse à ces questions et permet ainsi d'étendre l'analyse dans une perspective plus globale. Ce modèle est une variante de celui de Thomson auquel a été ajoutée une composante reflétant les bénéfices écologiques associés au verrouillage du carbone par le bois. On va présenter les données reliées au bénéfice écologique à la première section pour exposer le modèle proprement dit à la seconde section. Les sections trois et quatre respectivement discutent des méthodes de résolution et font état des résultats.

1- Données

On se concentre sur deux produits forestiers : le bois marchand et le carbone. Pour déterminer quelle est la valeur sociale d'un peuplement forestier, il faut connaître la valeur du bois et celle du carbone emmagasiné par la forêt. La valeur du bois est donnée par le produit du prix d'un m^3 de bois par le volume de bois récolté. Cependant, le bénéfice écologique que procure le carbone verrouillé ne se transige pas sur le marché. On doit évaluer la quantité de carbone verrouillé par le peuplement forestier pendant le cycle végétatif et estimer la valeur d'une unité de réduction de carbone pour la société en vue d'arriver à chiffrer ce bénéfice. La quantité de carbone emmagasiné (Q) par une forêt est directement proportionnelle au volume des arbres. Sous l'hypothèse d'une forêt équienne, on peut représenter, à une erreur près, le volume par la fonction suivante (Payandeh, 1991) :

$$Y_j = \phi S^\phi (1 - e^{\eta j})^\psi \quad (1)$$

où Y est le volume marchand du bois (m^3 / ha); j est l'âge du peuplement; S est l'indice de site (m) à 50 ans et ϕ, ϕ, η, ψ sont des paramètres du modèle. Cette fonction est telle que le volume du bois augmente d'abord à un taux croissant, puis à un taux décroissant, atteint un maximum pour enfin décroître (Grayson, 1989). La quantité de carbone verrouillé est obtenue à partir du volume marchand grâce à la relation (Adger et Brown, 1994):

$$Q_j = Y_j * \beta * D * \rho \quad (2)$$

où β est un facteur qui corrige pour le fait que le volume biologique est supérieur au volume marchand; il donne le rapport de la biomasse forestière (tiges, racines, branches) au volume de bois utilisable; D est la densité du bois ($tonne / m^3$) et ρ est le contenu de carbone en proportion de la matière sèche.

La valeur d'une tonne de carbone verrouillée par la forêt peut s'évaluer au coût de réduction d'une tonne de carbone par la méthode de réduction alternative la moins coûteuse. Une étude de l'OCDE (1993) a montré que des carburants de substitution, notamment le diesel et le gaz naturel comprimé (GNC) offrent des perspectives financières les plus intéressantes en ce sens qu'ils permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre de manière rentable. Les coûts liés à l'utilisation des véhicules fonctionnant au carburant diesel et au GNC sont calculés pour les Etats-Unis et la France en l'an 2000. Dans tous les cas de figure, les coûts de réduction des émissions ne dépassent pas \$600 par tonne de carbone et

peuvent même atteindre le niveau de \$200 aussi bien aux Etats-Unis qu'en France. Ces valeurs capitalisées correspondent à un coût annuel de \$8 à \$24 en appliquant un taux d'actualisation de 4%.

D'autres auteurs comme Nordhaus (1991); Cline (1992) et Fankhauster (1992) ont également estimé la valeur économique d'emmagasinier du carbone. Sur la base de ces différentes études, on peut estimer de manière conservatrice la valeur d'une tonne de réduction de carbone à \$10. On peut finalement estimer le bénéfice écologique à chaque période qu'on peut tirer d'un ha de forêt convenablement aménagé et utilisé. À titre d'exemple, ce bénéfice écologique est de \$ 516 pour un site de pin gris âgé de 60 ans. Cette valeur représente la base sur laquelle on parvient à internaliser le bénéfice associé au phénomène de réduction de l'effet de serre par la forêt.

2- Le modèle théorique

Le problème d'exploitation forestière présente trois caractéristiques importantes. D'abord, les décisions sont partiellement irréversibles. L'irréversibilité vient du fait qu'une forêt une fois coupée prend en moyenne une cinquantaine d'années pour atteindre la maturité biologique ou financière. En second lieu, le problème d'exploitation forestière est dynamique. On veut étudier les âges optimaux de coupe à travers le temps. Enfin ce problème est aussi stochastique. Les dividendes futurs qu'on peut tirer d'une coupe forestière ne sont jamais certains puisque le prix du bois fluctue d'année en année. Ces trois caractéristiques justifient l'utilisation de la méthode des options réelles pour évaluer un peuplement forestier

et donc déterminer les rotations optimales. Le gérant ayant la possibilité de couper une forêt détient une option : il peut récolter son peuplement mais il n'est pas obligé de le faire. S'il décide de procéder à la récolte, il exerce son option. Il abandonne la possibilité d'attendre de nouvelles informations sur les conditions du marché. Cette flexibilité a une valeur qui est justement prise en compte dans le modèle de valeur d'option. On va approfondir ce concept dans le cadre de la forêt. Commençons par énoncer les hypothèses de base retenues :

- La forêt génère une externalité climatique : verrouillage de carbone dotant la forêt du potentiel de diminuer le niveau des gaz à effet de serre; cette externalité est fonction du volume du bois et donc de l'âge;
- Le coût social d'une unité d'émission de carbone (ou le bénéfice pour la société d'une unité de réduction de carbone) est constant et exogène;
- La croissance des arbres n'est pas affectée par des éléments aléatoires ;
- La fonction de distribution du prix du bois suit un mouvement brownien géométrique;
- Le peuplement est exploité pour son bois et sa capacité d'absorption de carbone ou bien l'exploitation forestière est abandonnée après la coupe et le terrain nu est consacré à un meilleur usage alternatif;
- L'horizon de planification est infini. Le cadre d'analyse est le peuplement forestier, c'est-à-dire un ensemble d'arbres qui sont tous de même âge et de même espèce.

Les hypothèses de prix stochastique et d'horizon infini ne permettront pas d'obtenir des solutions analytiques. C'est pourquoi on va recourir à des méthodes numériques. À cette fin, on se servira du modèle binomial de valeur d'option développé par Cox, Ross et Rubinstein (1979). Le processus de diffusion du prix est donné par :

$$dP = \alpha P dt + \sigma P dz \quad (3)$$

où t est le temps; α est un paramètre donnant l'espérance du taux d'accroissement du prix du bois; σ est la volatilité du prix (écart-type instantané); dz est la variation d'un processus de Wiener.

Ce processus continu est remplacé par une promenade aléatoire discrète de période δt : mouvement à la hausse ou à la baisse du prix. Supposons qu'au départ le prix du bois est P . À la prochaine période, il peut soit augmenter au niveau (hP) avec une probabilité π ; soit diminuer au niveau (bP) avec une probabilité $(1 - \pi)$. Quand $\delta t \rightarrow 0$, le processus binomial converge vers le mouvement brownien géométrique (3) dans la mesure où $h = e^{\sigma \sqrt{\delta t}}$ et $b = 1/h$; $\pi = (e^{\alpha \delta t} - b) / (h - b)$ (Nelson et Ramaswamy, 1990).

À partir de cette structure, on peut construire un arbre des prix du bois possibles avec les probabilités de passage d'un prix à l'autre. Ainsi, on peut calculer la valeur sociale d'un peuplement forestier à travers le temps.

La valeur sociale d'un peuplement dépend de l'utilisation qui est faite du bois récolté. Pour tenir compte de ce fait, on peut considérer un coefficient de pondération λ , compris entre 0 et 1 et défini comme étant la proportion de carbone libérée pendant et après la coupe des arbres. Le bois peut être utilisé pour la construction, l'ameublement; dans ce cas, il est intégralement conservé et le carbone reste verrouillé ($\lambda = 0$). Le bénéfice écologique est seulement partiel si le bois est utilisé dans les produits recyclables comme la papeterie ($0 < \lambda < 1$). Le bois peut aussi être utilisé pour la cuisson, le chauffage; il est brûlé et ce cas correspond à une perte écologique totale ($\lambda = 1$). Dans n'importe lequel de ces scénarios, si

on récolte aujourd'hui, la société reçoit la valeur du bois et du terrain nu et la valeur correspondant au bénéfice écologique net. Ce dernier est donné par la valeur capitalisée des flux de bénéfices correspondant au maintien sous forme verrouillée d'une proportion $(1-\lambda)$ de la masse de carbone présente dans le bois. Si on décide d'attendre, la valeur du peuplement une période plus tard inclut la valeur pour la société du carbone verrouillé dans les arbres. Durant la période d'attente, la société bénéficie en outre d'une sorte de dividende : la valeur engendrée par le service d'épuration de l'air que fournit la forêt.

Par ailleurs, si nous adoptons l'hypothèse de la neutralité au risque, nous pouvons évaluer les profits futurs en actualisant leurs valeurs espérées au taux d'intérêt sans risque r . La valeur totale du peuplement pour la société est donc donnée par la plus élevée des deux valeurs : ce que la société obtient en récoltant en t et l'espérance de ce qu'elle obtiendra en attendant encore au moins une période.

$$V(P_t, Y_{t,j}, Z) = \text{Max} \left\{ P_t Y_{t,j} + (1 - \lambda)(Z/r)Q_{t,j} + V(P_t, Y_{t,0}, Z) ; \right. \\ \left. [V(P_{t+1}, Y_{t+1,j+1}, Z) - C + ZQ_{t,j}] / (1+r) \right\} \quad (4)$$

où P_t est le prix du bois au temps t ; $Y_{t,j}$ est le volume du bois au temps t pour un peuplement d'âge j ; Z est la valeur pour la société d'une unité de réduction de carbone par unité de temps; $Q_{t,j}$ est la quantité de carbone emmagasinée au temps t par le peuplement d'âge j ; elle est fonction du volume du bois; $V(P_t, Y_{t,0}, Z)$ est la valeur du terrain nu, c'est-à-dire la valeur d'un peuplement d'âge zéro en t lorsque le prix du bois est P_t ; comme on le verra plus bas le terrain peut rester à usage forestier ou être consacré à un autre usage; $ZQ_{t,j}$ est le bénéfice écologique de la période; il constitue un flux; $(1-\lambda)(Z/r)Q_{t,j}$ est le bénéfice

écologique net tiré du bois récolté; ce bénéfice est capitalisé et constitue un stock; C est le coût de gestion du peuplement.

Le terme $P_t Y_{t,j}$ est la valeur de la récolte en t pour un peuplement d'âge j . En l'ajoutant à la valeur du terrain nu $V(P_t, Y_{t,0}, Z)$, et au bénéfice écologique net, on obtient la valeur totale du peuplement si la récolte est effectuée aujourd'hui. On compare cette valeur à la valeur attendue une période plus tard si la récolte est retardée. Le maintien du peuplement pendant une période additionnelle requiert des coûts de gestion (C) qui doivent être soustraits de la valeur de la prochaine récolte. Ils sont par hypothèse exogènes, déterministes et constants. Si le prix du bois, les coûts de gestion et le taux de croissance des arbres sont tous constants dans le temps, la résolution de l'équation (4) aboutit au résultat de Faustmann et $V(P_t, Y_{t,0}, Z)$ est la valeur du terrain nu de Faustmann.

En réalité, $V(P_{t+1}, Y_{t+1,j+1}, Z)$ dépend de la réalisation des prix futurs incertains à travers le temps. En un temps t quelconque, le prix suit un processus stochastique binomial et le volume du bois est donné par la fonction (1) Ainsi, les valeurs actuelle et attendue de la forêt sont explicitement déterminées à des nœuds discrets.

Si on remplace la seconde expression de l'équation (4) par sa valeur, on obtient une équation dont la solution donne la condition de maturité pour n'importe quel prix de l'arbre binomial :

$$V(P_t, Y_{t,j}, Z) = \text{Max} \{ P_t Y_{t,j} + (1 - \lambda)(Z/r)Q_{t,j} + V(P_t, Y_{t,0}, Z) ; \\ [\pi V(hP_t, Y_{t+1,j+1}, Z) + (1 - \pi)V(bP_t, Y_{t+1,j+1}, Z) - C + ZQ_{t,j}] / (1 + r) \} \quad (5)$$

où: $V(hP_t, Y_{t+1,j+1}, Z)$ est la valeur de la forêt une période plus tard en cas de hausse du prix;
 $V(bP_t, Y_{t+1,j+1}, Z)$ est la valeur de la forêt une période plus tard en cas de baisse du prix; et la maximisation s'effectue par la décision de récolter en t ou d'attendre au moins une période.

3- Résolution

L'équation (5) est récursive et permet de choisir l'âge optimal de coupe. À supposer que l'on connaisse la valeur du peuplement à une date T que nous appellerons la dernière période, on peut en déduire la valeur de V à toutes les dates antérieures en solutionnant (5). Ainsi, la valeur du peuplement en un temps t quelconque reflète la possibilité d'exercer en tout temps t l'option de couper le peuplement. Les questions du choix de T et de la détermination de V à cette date sont abordées aux paragraphes suivants.

L'équation (5) montre aussi que la valeur du peuplement dépend des valeurs de la prochaine période. En conséquence, l'évaluation ne peut s'effectuer que si l'on connaît les valeurs futures du peuplement. Comme on est en face d'un problème à horizon infini, ceci pose une difficulté que l'on surmonte en postulant qu'il existe une période finale T . On peut montrer que l'erreur d'approximation ainsi faite peut être rendue arbitrairement faible en choisissant une période T suffisamment élevée. Par hypothèse, la décision optimale en T est de récolter le peuplement quel que soit le prix du bois. Le processus récursif commence donc à partir de la période T et consiste à évaluer, à chaque prix et volume si la valeur immédiate

de la récolte, des bénéfices externes et du terrain excède la valeur présente attendue de la meilleure décision de la prochaine période et ainsi la marche arrière continue jusqu'à la période actuelle.

La condition terminale s'appliquant en T exige que $V(P_T, Y_{T,j}, Z)$ soit égale à la valeur de la forêt à la période finale, c'est-à-dire la somme de la valeur du bois ($P_T Y_{T,j}$), du bénéfice écologique net $((1 - \lambda)(Z/r)Q_{T,j})$, et de la valeur du terrain nu ($V(P_t, Y_{t,0}, Z)$).

$$V(P_T, Y_{T,j}, Z) = P_T Y_{T,j} + (1 - \lambda)(Z/r)Q_{T,j} + V(P_t, Y_{t,0}, Z) \quad (6) \quad j = 0, 1, 2, \dots, J$$

J est l'âge maximum des arbres dans le modèle. Il est choisi tel qu'il n'influence pas les résultats : à l'âge J, la valeur commerciale du bois diminue avec l'âge et il est désirable de couper même s'il y a possibilité de hausse du prix. Cependant, il se peut qu'il soit désirable de récolter à un âge inférieur à J, et c'est précisément ce que détermine la résolution du problème (5). Avant d'y arriver, nous allons traiter la question de la valeur du terrain.

La valeur du terrain, $V(P_t, Y_{t,0}, Z)$ dans l'équation (6) correspond au maximum de deux valeurs : celle du terrain dans l'usage forestier et celle du terrain dans l'usage alternatif. Si la valeur du terrain dans l'usage alternatif est supérieure à celle dans l'usage forestier, alors il faut abandonner l'activité forestière pour passer à l'usage alternatif à la dernière période et vice versa. La valeur du terrain dans le modèle est calculée comme suit. Si le peuplement est récolté en t, il est remplacé par un autre peuplement âgé d'un an à la prochaine période à moins que le terrain soit converti à un usage alternatif ou abandonné. Si la valeur de ce

peuplement d'un an à la prochaine période excède les coûts de régénération et les coûts d'entretien d'une période, la valeur du terrain est la valeur de la forêt âgée d'une année moins les coûts de régénération immédiats et les coûts d'entretien actualisés pour la période. Si ce calcul donne une valeur moindre que celle d'un usage alternatif, alors la valeur du terrain est celle de l'usage alternatif; ce qui signale une conversion de la forêt. S'il n'y a pas d'usage alternatif pour le site, sa valeur est nulle et dans ce cas, choisir un usage alternatif signifie tout simplement l'abandon de l'activité forestière et du terrain. Les résultats incluent donc la valeur d'option d'abandonner le terrain ou de convertir la forêt à un autre usage si le prix du bois est trop bas pour justifier une telle activité. L'équation donnant la valeur du terrain s'écrit comme suit :

$$V(P_t, Y_{t,0}, Z) = \text{Max}\{[\pi V(hP_t, Y_{t+1,1}, Z) + (1 - \pi)V(bP_t, Y_{t+1,1}, Z) - C] / (1+r) - D; \text{Alt}\} \quad (7)$$

où D représente les coûts de régénération du peuplement (\$/ha); Alt est la valeur du terrain dans un autre usage.

Cette équation traduit le fait que si une activité alternative se révèle plus rentable que l'exploitation forestière malgré que les bénéfices externes soient dûment considérés, le gérant détient l'option d'entreprendre l'activité en question. Certains auteurs modifient l'équation (7) de façon à éliminer l'option d'abandonner l'activité forestière. La valeur d'option calculée est alors uniquement celle de la flexibilité dans la période de récolte et on se limite aux modèles de prix critique comme principal déterminant de l'âge de rotation (Brazee et Mendelsohn, 1988; Forboseh et al, 1996).

Le processus récursif commence avec l'équation (6) qui est utilisée pour calculer les valeurs des peuplements pour tous les P et Y_j en $t = T$. À ce stade, on traite la valeur du terrain nu comme exogène en fixant $V(P_t, Y_{t,0}, Z) = \text{Alt}$. Ensuite, l'équation (5) est évaluée pour toutes les valeurs de P et Y_j à la période $t = T - 1$. Le choix de la stratégie de valeur plus élevée à cette période incorpore les décisions optimales de récolter ou d'attendre et, si l'option de récolter est retenue, de régénérer ou de convertir la forêt à l'usage alternatif. Si le peuplement est d'âge J à la date $T-1$, alors il doit être récolté. À chaque date t on détermine en fonction du prix les âges auxquels il faut couper les arbres et les âges auxquels il faut attendre; l'âge critique constitue l'âge optimal de coupe. En appliquant (5), on obtient la valeur de $V(P_t, Y_{t,j}, Z)$ correspondante, y compris la valeur correspondant à $Y_{t,0}$, qui est la valeur du terrain nu. À chaque nouvelle récursion correspond donc une nouvelle approximation de la fonction V ; le choix d'une valeur arbitraire du terrain nu en T a de moins en moins d'influence sur cette approximation. On interrompt le processus d'itération lorsque les changements dans l'évaluation de la fonction V entre t et $t-1$ sont inférieurs à ϵ à chaque prix et volume.

Le modèle déterministe peut être obtenu à partir du modèle stochastique en fixant les paramètres de dérive et de volatilité à zéro. La même approche de programmation dynamique est utilisée pour calculer l'âge optimal de coupe du modèle déterministe. On peut aussi déterminer cet âge optimal de coupe de manière analytique. Pour cela, le critère retenu est celui de la maximisation des revenus actualisés. On maximise la valeur sociale présente nette du peuplement en fonction de l'âge de récolte A . Si l'on considère le cas d'une rotation, l'expression donnant la valeur sociale du peuplement est :

$$V_1(A) = e^{-rA}PY(A) - D + e^{-rA}(1 - \lambda)(Z/r)Q(A) + \int_0^A e^{-rt}ZQ(t)dt \quad (8)$$

Au moment de la récolte, on reçoit la valeur nette du bois, plus la valeur du carbone verrouillé réduite de la perte écologique nette et le flux de dividende obtenu suite au service de verrouillage du carbone par la forêt.

Cette expression ne tient pas compte du fait qu'après la coupe, la terre est prête à accueillir une nouvelle forêt. Plus la récolte sera retardée, plus on devra attendre les revenus générés par cette nouvelle forêt. On peut prouver que, lorsque P est constant, les rotations doivent être égales. On doit avoir $A_1 = A_2 = \dots = A_\omega = A$. On réécrit l'expression précédente en y ajoutant la contribution des rotations futures. La valeur sociale du peuplement devient :

$$V(A) = \sum_{\omega=0}^{\infty} e^{-r\omega A} [e^{-rA}PY(A) - D + e^{-rA}(1 - \lambda)(Z/r)Q(A) + \int_0^A e^{-rt}ZQ(t)dt] \quad (9)$$

Où ω est l'intervalle de temps entre la régénération et la récolte; c'est-à-dire la rotation.

Les conditions de premier ordre requièrent que A satisfasse l'équation suivante :

$$PY' + \lambda ZQ(A) + (1 - \lambda)(Z/r)Q' = rV(A) + rPY(A) \quad (10)$$

Les membres de gauche de l'équation représentent des bénéfices (ce que l'on gagne du fait qu'on maintient le peuplement debout) et ceux de droite des coûts d'opportunité (ce que l'on perd du fait qu'on ne coupe pas). PY' est l'augmentation dans la valeur nette du bois debout par unité de temps. $\lambda ZQ(A)$ représente la différence entre le flux de service écologique que fournit la forêt debout (ZQ) et le flux de service obtenu du bois récolté $(1 - \lambda)ZQ$. Si $\lambda = 0$, on obtient le même dividende écologique que le bois soit récolté ou non. Si

$\lambda > 0$, le dividende disparaît partiellement au moment de la récolte et le fait d'attendre prolonge l'obtention de ce bénéfice écologique. $(Z/r)Q'$ est l'augmentation dans la valeur de carbone verrouillé par unité de temps. Ce bénéfice peut disparaître si, lors de la coupe, tout le bois est brûlé; ce qui est traduit par le coefficient $(1-\lambda)$.

Le terme $rPY(A)$ est l'intérêt qui peut être gagné si le revenu net tiré du bois récolté est investi à un taux d'intérêt r ; c'est donc le coût d'opportunité du bois debout. Mais comme il y a plusieurs rotations, le fait d'attendre implique également le coût de retarder les récoltes futures; puisque la valeur du terrain nu reflète celle des récoltes futures, ce coût se mesure comme un coût d'opportunité du terrain nu, $rV(A)$.

La condition de premier ordre nous dit que la forêt doit être récoltée quand la somme de la valeur du bois, de la valeur nette du carbone supplémentaire verrouillé et du dividende obtenu est égale à la somme du coût d'opportunité d'investir le capital qu'on obtiendrait si le bois était récolté et du coût d'opportunité du terrain. Il faut noter que ce dernier inclut la valeur de verrouiller du carbone dans le futur et la valeur du bois marchand des récoltes futures.

Si $Z = 0$, on reproduit le modèle de Faustmann : la valeur de la croissance du bois devrait couvrir à elle seule les coûts d'opportunité associés au bois et au terrain. Ceci implique, toutes choses étant égales par ailleurs, un plus fort accroissement de volume. L'âge de maturité est atteint à une pente plus abrupte sur la courbe de volume : il est donc plus

faible que si Z est positif. Ce résultat se retrouve également dans l'analyse numérique du modèle (Appendice D, Tableau 4).

4- Analyse numérique

Les résultats³ qui vont être présentés dans cette section correspondent à ceux du modèle élaboré dans ce travail. Il est bien connu que la prise en compte de la volatilité du prix du bois augmente l'espérance de la valeur nette du peuplement (Lohmander, 1987; Thomson, 1992). En considérant simultanément la capacité de la forêt à réduire le niveau des gaz à effet de serre, cette valeur espérée augmente davantage. Puisque le bénéfice écologique est valorisé dans le modèle, l'activité forestière devient plus rentable.

Un des résultats fondamentaux de ce modèle est que, pour des prix du bois faibles l'âge de coupe augmente encore plus comparativement aux modèles qui ne tiennent pas compte du verrouillage de carbone. Ce résultat s'explique par le fait que de faibles prix du bois font augmenter le poids du facteur carbone dans la décision de récolte. On est amené à retarder la récolte du peuplement de façon encore plus marquée que dans les modèles qui ne considèrent que la valeur du bois.

Il n'y a pas que le prix du bois qui peut influencer l'âge optimal de récolte lorsque la forêt est aussi exploitée pour sa capacité à réduire le niveau des gaz à effet de serre. L'utilisation qui sera faite du bois récolté détermine ce qu'il adviendra du carbone verrouillé pendant le cycle végétatif du peuplement. Elle est donc déterminante dans la décision du

planificateur social de récolter ou non le peuplement. On va discuter des deux cas extrêmes : celui où le bois récolté est entièrement conservé et celui où le bois récolté est complètement détruit.

Le tableau 1 présente la valeur sociale du peuplement pour certains prix et certains âges du peuplement lorsque le carbone verrouillé est entièrement conservé. Dans ce cas, on coupe toujours à un âge fini. L'âge optimal de coupe, pour un prix donné, est atteint plus rapidement que si le carbone devait être libéré. Sachant que le carbone restera verrouillé après la coupe, le planificateur n'a plus besoin de retarder la récolte pour différer la perte en carbone qui lui est associée. C'est mieux de couper et de régénérer pour profiter au plus vite du fort taux de croissance des arbres équivalent à un fort taux d'emmagasiner du carbone.

³ Pour les valeurs des paramètres servant au calcul de la valeur du peuplement, voir Appendice A.

Tableau 1- Valeurs sociales courantes du peuplement et âges de coupe optimaux selon le prix réalisé en cas de conservation du carbone ($\lambda = 0$)

Âge	Prix							
	12	20	37	50	67	101	203	499
41	14750	15508	17169	18502	20343	23917	35207	68615
42	14966	15745	17453	18825	20718	24395	36017	70412*
43	15177	15978	17734	19145	21093	24876	36837	72186
44	15383	16207	18013	19464	21468	25361	37673*	73889
45	15585	16433	18290	19782	21843	25847	38508	75520
46	15783	16655	18565	20100	22220	26340	39307	77080
47	15978	16874	18838	20417	22598	26840*	40070	78570
48	16170	17091	19110	20734	22976	27328	40798	79991
49	16358	17306	19382	21052	23361*	27793	41491	81343
50	16544	17519	19654	21372*	23733	28236	42149	82630
51	16728	17730	19925	21690	24086	28656	42775	83851
52	16911	17941	20200*	21991	24422	29054	43369	85010
53	17091	18151	20462	22277	24739	29432	43931	86109
54	17271	18360*	20711	22548	25040	29790	44464	87149
55	17450	18568	20946	22804	25324	30128	44968	88133
56	17629*	18765	21168	23046	25593	30448	45444	89063

*: Âge optimal de coupe

Lorsque le stock de carbone verrouillé est complètement libéré ($\lambda = 1$), la quantité de carbone émise au moment de la destruction du stock compense exactement celle qui a été emmagasinée durant le cycle végétatif de la forêt. Le bilan de carbone est donc nul à la récolte. Au contraire, en décidant d'attendre, on conserve ce stock de carbone verrouillé tout en permettant à la forêt de continuer à emprisonner du carbone supplémentaire et de ce fait à procurer le dividende écologique sous forme de flux. On va garder le peuplement forestier plus longtemps puisqu'ainsi, on évitera la perte écologique. La rotation optimale se trouve donc rallongée. Le tableau 2 fait état des résultats en question.

Tableau 2- Valeurs sociales courantes du peuplement et âges de coupe optimaux selon le prix réalisé en cas de libération du carbone ($\lambda = 1$)

Âge	Prix							
	12	20	37	50	67	101	203	499
41	10548	10947	11805	12516	13568	15904	25259	57656
42	10602	11012	11894	12621	13696	16079	25664	59014
43	10645	11066	11972	12717	13814	16245	26070	60389*
44	10676	11110	12040	12803	13923	16403	26466	61788
45	10696	11143	12099	12880	14024	16552	26864	63129
46	10705	11165	12147	12948	14116	16694	27251	64412
47	10704	11177	12186	13006	14200	16828	27641	65637
48	10691	11178	12216	13056	14275	16954	28021	66805
49	10668	11169	12235	13097	14342	17073	28400	67917
50	10634	11149	12246	13129	14402	17185	28777	68975
51	10589	11119	12247	13153	14454	17289	29139	69979
52	10533	11079	12239	13168	14498	17387	29509*	70932
53	10467	11029	12221	13174	14534	17477	29876	71835
54	10390	10968	12195	13173	14564	17562	30224	72690
55	10302	10897	12159	13163	14586	17640	30553	73499
56	10203	10816	12114	13145	14600	17713	30863	74263
57	10094	10725	12060	13118	14608	17779	31157	74985
58	9973	10623	11997	13084	14609	17840	31434	75667
59	9842	10510	11924	13041	14603	17895	31695	76310
60	9699	10387	11842	12990	14590	17945	31942	76915
65	8815	9610	11289	12607	14423	18120	32972	79451
70	7622	8541	10480	12000	14077	18186	33728	81310
75	6083	7145	9384	11139	13531	18155	34278	82661

*: Âge de coupe optimal

En fait, on ne coupe que si le prix du bois est très élevé. C'est ce que traduit la série (TAC-1) de la figure 1 où l'on envisage de récolter seulement quand le prix du bois atteint le niveau de 203 \$ / m³. Pour un tel prix critique, l'âge de coupe est de 52 ans alors qu'il serait de 44 ans si on devait conserver le bois récolté.

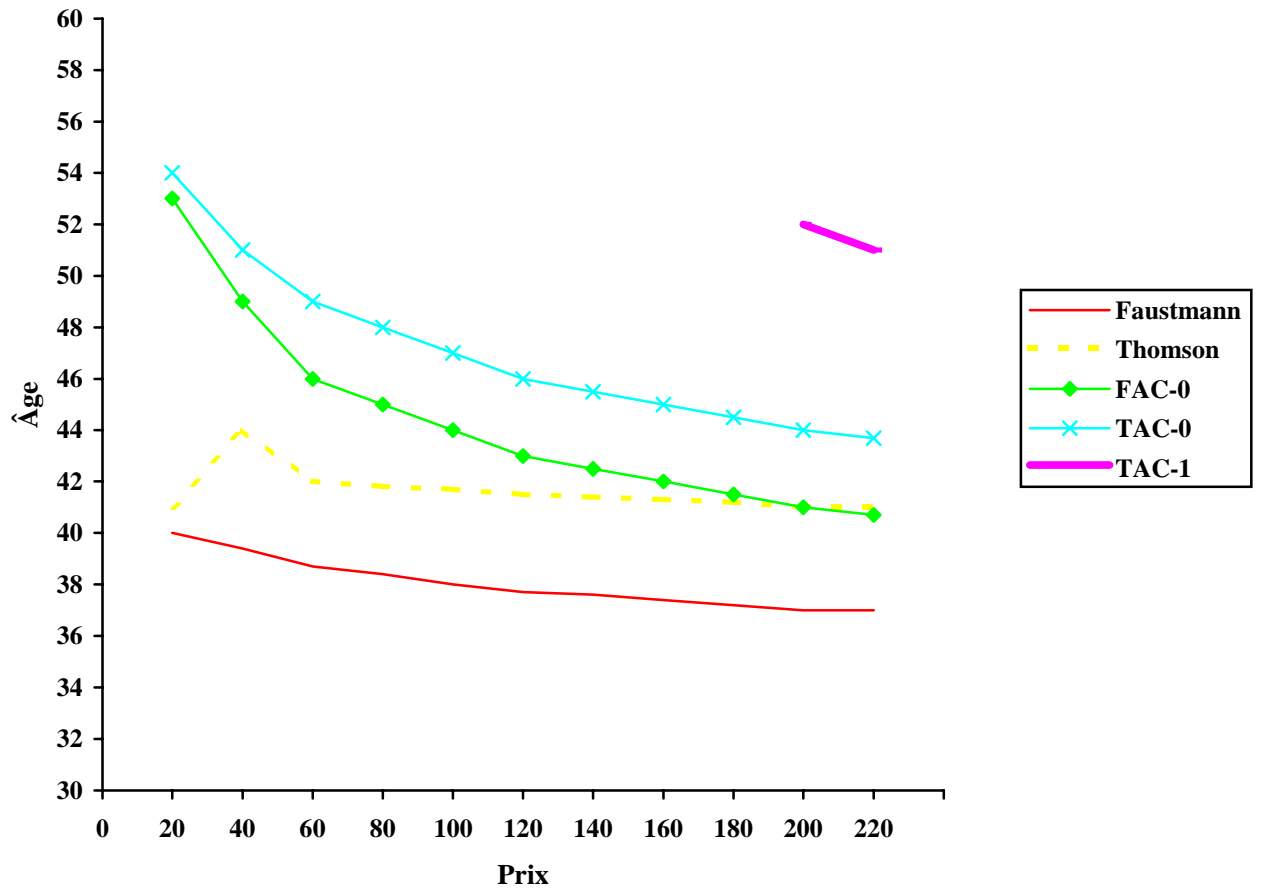


Figure 1 : Âges optimaux de coupe en fonction du prix du bois pour différents modèles⁴.

Une autre question pertinente est de se demander comment l'âge optimal varie en fonction du prix d'une unité de carbone. En effet, ce dernier peut varier suivant le développement technologique ou le degré de concentration de l'air en dioxyde de carbone. Les résultats analytiques montrent que $dT/dZ > 0$ quand $\lambda = 1$ mais ne permettent pas de déterminer le signe de dT/dZ lorsque $\lambda < 1$ (Voir Appendice C). L'intuition est que quand le bois doit être brûlé, la perte écologique est d'autant plus grande que le prix d'une unité de carbone est élevé; le gérant a intérêt à retarder la récolte pour éviter cette perte et maintenir ce

dividende de plus en plus élevé. Cependant, si la totalité ou une partie du carbone est conservée lors de la coupe, le dividende est maintenu qu'il y ait coupe ou non. Couper les arbres et planter une nouvelle génération de forêt peut engendrer une croissance marginale plus élevée de la valeur ligneuse et écologique de la forêt. L'âge de coupe ne va pas nécessairement augmenter avec la valeur de l'unité de carbone. Il faut signaler que, pour les paramètres de notre exemple numérique, on trouve que l'âge optimal de coupe augmente lorsque le prix d'une unité de carbone augmente : pour un prix du bois donné, on coupe plus tard quand Z augmente. Par exemple, dans le modèle stochastique avec carbone, lorsque tout le bois est conservé et pour un prix de 50 \$/m³, l'âge optimal de coupe est atteint à 48 ans si le prix d'une unité de carbone est de 10 \$/tonne alors que si ce dernier est de 80 \$/tonne, l'âge optimal de coupe est de 54 ans (Voir Appendice D, Tableau 3).

L'impact de la prise en compte du verrouillage de carbone sur les superficies forestières constitue un des points d'intérêt de ce travail. L'activité forestière devient socialement plus rentable dans le cas où l'emmagasiner du carbone est considéré. Même si le prix du bois enregistre des baisses consécutives, le bénéfice écologique compense suffisamment qu'il ne soit pas désirable de couper tôt et de passer à un usage alternatif. On va changer d'activité moins souvent. En fait, pour les valeurs choisies du terrain à l'usage alternatif ($Alt = 0$) et d'une tonne de réduction de carbone ($Z = \$10/an$), l'activité forestière constitue le meilleur usage à faire du terrain indépendamment du prix et de l'utilisation du bois. Pour des valeurs de $Alt = \$4000$ et $\lambda = 1$ (libération du carbone verrouillé), si le prix du bois est inférieur ou égal à \$67/m³, on doit passer à l'usage alternatif. Par contre, pour des

⁴ TAC-0 : Thomson avec carbone pour $\lambda = 0$; TAC-1 : Thomson avec carbone pour $\lambda = 1$; FAC-0 :

valeurs de $\text{Alt} = \$4000$ et $\lambda = 0$ (conservation du carbone verrouillé), on change d'activité seulement si le bois récolté vaut $\$20/\text{m}^3$ ou moins.

Ceci suggère que, dans le cas de conservation intégrale du carbone, le terrain doit avoir beaucoup de valeur à l'usage alternatif et parallèlement, le prix du bois doit être faible pour qu'il soit socialement préférable d'abandonner l'activité forestière. Si on internalise les bénéfices associés au verrouillage du carbone par la forêt, on doit assister à une certaine augmentation des superficies plantées en forêt du fait que les surfaces forestières en place seront maintenues et que de nouvelles superficies seront mises en forêt.

Les résultats obtenus dans cette étude permettent de formuler des recommandations pertinentes tant pour les secteurs public, parapublic ou privé. Elles consistent à:

a) Subventionner (taxer) les activités qui contribuent à garder (libérer) le carbone verrouillé

La diminution du niveau des gaz à effet de serre par la forêt améliore le bien-être de la société puisque la valeur sociale du peuplement est plus élevée que la valeur commerciale. Pour que les compagnies forestières considèrent adéquatement les bénéfices externes de leurs décisions, elles devraient recevoir une subvention annuelle de $ZQ(t)$ pour chaque ha de forêt planté ou régénéré; une subvention annuelle égale à la valeur totale du carbone emmagasiné pour cette année.

Fausmann avec carbone pour $\lambda = 0$.

De la même manière, ces entreprises forestières devraient faire face à un système de taxation au moment de la récolte. La taxe serait donnée par l'expression $\lambda ZQ(t)$ pour chaque ha de forêt récolté. Cette taxe représente le coût social du carbone qui est libéré dans l'atmosphère. Ainsi, si le bois coupé doit être utilisé dans la construction ou la fabrication de meubles, il n'y a pas de taxe à verser sur le produit récolté. Cette taxe est donc conditionnelle à l'utilisation qui est faite du bois récolté. Quant aux permis d'émission que l'on envisage d'accorder à des firmes qui assureraient l'afforestation de certains terrains, notre analyse montre qu'ils devraient idéalement tenir compte de l'utilisation qui sera faite de la future forêt.

b) Investir davantage dans la lutte contre les feux de forêt

Les feux de forêt constituent de nos jours un phénomène de plus en plus alarmant. Les dommages physiques généralement considérés dans l'évaluation des dégâts sont énormes. Cependant, les dommages environnementaux ne sont pas à négliger. Puisqu'ils restituent intégralement dans l'atmosphère le carbone emmagasiné, les feux de forêt correspondent au cas de figure où $\lambda = 1$; ils contribuent à augmenter le phénomène de l'effet de serre. Pour une évaluation adéquate des dommages causés par ces feux de forêt, on doit considérer le coût social du carbone qui est libéré dans l'atmosphère en cette circonstance. Ceci aura pour effet d'augmenter le coût estimé des dommages; ce qui peut justifier un investissement plus important dans la lutte contre les feux de forêt.

c) Accorder la priorité, dans les programmes de reboisement, aux espèces forestières à forte croissance des pays tropicaux

La quantité de carbone emmagasiné est fonction du volume et donc de la croissance des arbres. Plus un arbre croît rapidement, plus vite il emmagasine du carbone pour contribuer à réduire le phénomène de l'effet de serre, rendant ainsi l'activité forestière socialement plus rentable. Dus aux facteurs climatiques, les espèces végétales des pays tropicaux ont une croissance plus forte que celles des pays tempérés. Elles emmagasinent donc davantage de carbone par unité de temps. Selon des prévisions qualitatives, les âges optimaux de coupe seront plus courts dans le cas des forêts tropicales que dans celui des forêts tempérées, si le carbone reste verrouillé. En accordant la priorité à ces espèces tropicales, on peut augmenter la contribution de la forêt au phénomène de réduction de l'effet de serre tout en augmentant la rentabilité économique des programmes de reboisement. La protection de l'atmosphère ne passe par le ralentissement des coupes de bois tropicaux que dans la mesure où les surfaces concernées ne sont pas régénérées. Si elles le sont et si le carbone reste verrouillé, c'est plutôt une accélération des coupes qui serait désirable pour réduire la masse de gaz carbonique dans l'atmosphère.

CONCLUSION

Le but de ce travail a été d'examiner les implications sur la rotation optimale de l'incorporation simultanée des phénomènes de verrouillage de carbone par la forêt et de

l'incertitude du prix du bois. On a déterminé les âges optimaux de coupe en fonction du prix du bois, de l'utilisation faite du bois récolté et on a discuté du meilleur usage à faire du terrain après la récolte.

Les résultats trouvés ont conduit à la formulation des recommandations dans le cadre d'une politique de réduction du niveau des gaz à effet de serre en mettant la forêt à contribution. L'application de ces recommandations est tributaire de la valeur sociale implicite d'une unité de réduction de carbone. Or, cette valeur est influencée par des facteurs exogènes et revêt un aspect incertain. L'une des pistes de recherche ultérieure serait donc de modéliser, en plus du prix du bois, le prix de l'unité de carbone par un processus stochastique de manière à envisager comment les résultats vont être influencés. Par ailleurs, il serait intéressant de calculer l'augmentation de superficie correspondant au niveau socialement optimum. Pour cela, il faut déterminer la valeur optimale de λ (la proportion de carbone libérée dans l'atmosphère lors de l'utilisation commerciale du bois). En outre, l'âge optimal de coupe du point de vue du propriétaire privé étant différent de l'âge socialement optimum, on pourrait élaborer plus amplement et de manière quantitative sur les différents mécanismes incitatifs pouvant amener un propriétaire privé à s'aligner sur les intérêts de la société.

APPENDICE A

VALEUR DES PARAMETRES

Le prix du bois à la date de départ⁵ est $P_0 = 50 \text{ \$/m}^3$. La période finale choisie est $T=120$ et l'âge maximal des arbres dans le modèle est $J = 80$ ans. Les valeurs des paramètres du modèle de croissance ont été choisies pour le pin gris. Elles permettent d'obtenir le volume marchand (en m^3) à 7 cm de diamètre à hauteur de souche (Payandeh,1991).

$$\phi = 2.5363$$

$$S = 12.2$$

$$\phi = 1.611$$

$$\eta = -0.068$$

$$\psi = 8.015$$

Les valeurs des paramètres permettant de calculer la quantité de carbone verrouillé (Équation 2) sont : $\beta = 1.6$; $O = 0.52$; $\rho = 0.5$. Les paramètres de dérive (α) et de volatilité (σ) permettent de tracer le sentier des prix du bois. Ils sont choisis de manière arbitraire et sont respectivement de 0,01 et 0,1. Le coût annuel d'une unité d'émission de carbone est $Z=10$; (Voir Section 1). Si on fixe $Z = 0$, c'est comme si on ne tenait pas compte du bénéfice écologique; on retombe sur le modèle de Thomson. Le paramètre λ s'interprète comme étant la proportion de carbone libérée lors de la coupe des arbres. Si le bois récolté est totalement brûlé, tout le stock de carbone verrouillé est détruit : $\lambda = 1$. Au contraire, si le bois est intégralement conservé, le stock de carbone verrouillé est maintenu et représente un bénéfice écologique : $\lambda = 0$ (Voir Section 2). À travers ce paramètre, le programme est en mesure de calculer la valeur sociale du peuplement en fonction de l'utilisation qui est faite du bois récolté. Par ailleurs, le programme est exécuté pour des valeurs de $\text{Alt} = 0$ et 4000 $\text{\$/ha}$. Les coûts de régénération (D) sont de 800 $\text{\$/ha}$. Le taux d'escompte r considéré est de 4%.

⁵ Il représente le prix moyen payé, en 1996, par les usines aux producteurs de Pin Gris des syndicats et offices des Laurentides-Outaouais, de Québec et du Saguenay Lac St-Jean (Fédération des producteurs de bois du Québec, Statistiques 1996).

APPENDICE B : MODÈLE DÉTERMINISTE À PRIX CONSTANT

VARIATION DE L'AGE OPTIMAL DE COUPE PAR RAPPORT AU PRIX DU BOIS

La Condition de Premier Ordre (CPO) est : $\Theta(P, T) = 0$

où $\Theta = V' = PY' + \lambda ZQ(T) + (1 - \lambda) (Z/r)Q' - rV(T) - rPY(T)$

Par la différentiation totale, on a :

$$\frac{\partial \Theta}{\partial P} dP = - \frac{\partial \Theta}{\partial T} dT \Rightarrow \frac{dT}{dP} = - \frac{\partial \Theta / \partial P}{\partial \Theta / \partial T}$$

Par la condition du deuxième ordre, on a $\frac{\partial \Theta}{\partial T} < 0$

Pour trouver le signe de $\frac{\partial \Theta}{\partial P}$, divisons la CPO par P:

$$Y' + \frac{\lambda ZQ}{P} + \frac{(1 - \lambda)ZQ'}{rP} - \frac{rV}{P} - rY = 0$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial P} = \frac{-\lambda ZQ}{P^2} - \frac{(1 - \lambda)ZQ'}{rP^2} - \frac{r}{P} \frac{\partial V}{\partial P} + \frac{r}{P^2} V$$

$$= \frac{-\lambda QZ}{P^2} - \frac{(1 - \lambda)QZ}{rP^2} - \frac{r}{P} \left(e^{-rT} Y \right) \frac{e^{rT}}{e^{rT} - 1} + \frac{r}{P^2} \left[e^{-rT} PY - D + e^{-rT} (1 - \lambda) \frac{Z}{r} Q + \int_0^T e^{-rt} ZQ(t) dt \right] \frac{e^{rT}}{e^{rT} - 1}$$

$$= \frac{-\lambda QZ}{P^2} - \frac{(1 - \lambda)Q'Z}{rP^2} + \frac{r}{P} \left[\frac{PY}{P(e^{rT} - 1)} - \frac{De^{rT}}{P(e^{rT} - 1)} + \frac{(1 - \lambda)Z/rQ}{P(e^{rT} - 1)} + Z \frac{e^{-rT} Q e^{rT}}{P(e^{rT} - 1)} - \frac{Y}{(e^{rT} - 1)} \right]$$

Si $Z = 0$, on a $\frac{\partial \Theta}{\partial T} = - \frac{De^{rT}}{P(e^{rT} - 1)} < 0$ et donc $\frac{dT}{dP} < 0$.

APPENDICE C : MODÈLE DÉTERMINISTE À PRIX CONSTANT

VARIATION DE L'AGE OPTIMAL DE COUPE PAR RAPPORT AU PRIX DU CARBONE

Partons de la condition de premier ordre: $\Theta(Z,T) = 0$

Par la différentiation totale, on a:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial Z} dZ = - \frac{\partial \Theta}{\partial T} dT \Rightarrow \frac{dT}{dZ} = - \frac{\partial \Theta / \partial Z}{\partial \Theta / \partial T}$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial T} < 0 \text{ (Condition de second ordre)}$$

Pour trouver le signe de $\frac{\partial \Theta}{\partial Z}$, on remplace, dans la CPO, Q et Q' par Y et Y' respectivement¹². On a:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial Z} &= \frac{-r \partial V}{\partial Z} + \lambda Y + (1-\lambda) \frac{Y'}{r} \\ &= -r \frac{e^{rT}}{e^{rT} - 1} \left[e^{-rT} (1-\lambda) \frac{Y}{r} + \int_0^T e^{-rt} Y(t) d(t) \right] + \lambda Y + (1-\lambda) \frac{Y'}{r} \\ &= -\frac{(1-\lambda)Y}{e^{rT} - 1} - \frac{r e^{rT}}{e^{rT} - 1} \left[-\frac{1}{r} e^{-rT} Y + \frac{1}{r} Y(0) - \int_0^T \frac{1}{r} e^{-rt} Y' d(t) \right] + \lambda Y + (1-\lambda) \frac{Y'}{r} \\ &= \frac{-Y}{e^{rT} - 1} + \frac{\lambda Y}{e^{rT} - 1} + \frac{Y}{e^{rT} - 1} - \frac{e^{rT}}{e^{rT} - 1} \int_0^T e^{-rt} Y' d(t) + \lambda Y + (1-\lambda) \frac{Y'}{r} \end{aligned}$$

On met au même dénominateur tous les termes en Y

$$= \frac{\lambda Y + e^{rT} \lambda Y - \lambda Y}{e^{rT} - 1} - \frac{e^{rT}}{e^{rT} - 1} \int_0^T e^{-rt} Y' d(t) + (1-\lambda) \frac{Y'}{r}$$

$$= \frac{e^{rT}}{e^{rT} - 1} \left[\lambda Y - \int_0^T e^{-rt} Y' d(t) \right] + (1 - \lambda) Y' / r$$

Si $\lambda < 1$, le signe de $\partial \Theta / \partial Z$ n'est pas connu.

Si $\lambda = 1$, $\partial \Theta / \partial Z > 0$ et $dT / dZ > 0$.

APPENDICE D

Tableau 3 : Valeur sociale du peuplement et âge optimal de coupe en fonction du prix (\$/tonne) de l'unité de carbone

Âge	Valeur de Z				
	10	20	40	80	160
47	19782	35012	65844	127796	251863
48	20140*	35534	66709	129358	254827
49	20492	36057	67568	130903	257748
50	20827	36581	68424	132432	260632
51	21145	37109*	69277	133949	263485
52	21447	37616	70129	135457	266313
53	21733	38098	70982*	136959	269122
54	22003	38553	71808	138460*	271918
55	22259	38985	72589	139941	274708*
56	22502	39392	73327	141341	277431

* : Âge de coupe optimal.

Tableau 4 : Valeur commerciale du peuplement et âge optimal de coupe selon le prix du bois dans le modèle de Faustmann

Prix				
Âge	20	50	101	203
35	1373	3522	7734	16434
36	1427	3663	8043	17092
37	1485	3810	8365	17775*
38	1544	3962	8699*	18480
39	1606	4120*	9036	19163
40	1670*	4284	9363	19826
41	1733	4441	9678	20466

*: Âge optimal de coupe.

BIBLIOGRAPHIE

- Amin, K. (1991). «On the computation of continuous time options prices using discrete approximations» *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 26 (4) : 477-495.
- Ariste, R. (1998). *Prise en compte du verrouillage de carbone par la forêt et de l'incertitude du prix du bois : Conséquences sur la rotation optimale*. Mémoire de maîtrise – Université du Québec à Montréal.
- Brazee, R. et Mendelsohn, R. (1988). «Timber harvesting with fluctuating prices.» *Forest Science*, 34 : 359-372.
- Clarck, H.R. et Reed, W.(1989). "The tree-cutting problem in a stochastic environment" *Journal of Economic Dynamics and Control*, 13 (4) : 569-595.
- Cline, W.(1992) *The Economics of Global Warming*, Cambridge University Press.
- Conrad, J.M. (1997)."Analysis on the option value of old-growth forest". *Ecological Economics*, 22 (2) : 97-102.
- Cox, J., S. Ross et M. Rubinstein (1979) "Option pricing : a simplified approach" *Journal of Financial Economics*, 7 : 229-263.
- Cox, J. et Rubinstein, M.(1985). *Options Market*. Prentice-Hall, Inc.
- Dixit, A. et Pindyck, R.S. (1994). *Investment under uncertainty*. Princeton University Press.
- Fankhauser, S. (1992) *A point estimate of global warming damage*. Centre for Social and Economic Research on the Global Environment, University College London.
- Faustmann, M. (1849)." On the determination of the value which forest land and immature stands possess for forestry". *Institute Paper* no.42, Commonwealth Forestry Institute (University of Oxford, 1968)
- Forboseh, P.F.; Brazee, R.J. et Pickens, J.B.(1996). " A strategy for multiproduct stand management with uncertain future prices." *Forest Science*, 42 (1): 58-66.
- Freedman, B., Meth, F. et Hickman, C. (1992) « Temperate forests as a carbon storage reservoir for carbon dioxide emitted by coal-fired generating stations: a case study for New-Brunswick, Canada.» *Forest Ecology and Management*, 55:15-29.
- Grayson, A. J. (1989). *Carbon Dioxide, Global Warming and Forestry*. Research Note 146. Alice Holt, Forestry Commission Research Division.
- Haight, R. (1991). "Stochastic log pricing, land value and adaptive stand management: Numerical results for California White Fir." *Forest Science*, 37 (5): 1224-1238.

Haight, R. et Smith D.W. (1991) «Harvesting loblolly pine plantation with hardwood competition and stochastic prices.» *Forest Science*, 37 (5) : 1266-1282.

Hartman, R. (1976). "The harvesting decision when a standing forest has value". *Economic Inquiry*, 14 : 52-58

Junqueira, L. et Rui, M.E. (1985). *L'économie des ressources renouvelables*. Economica, Paris.

Lohmander, P. (1987). "The economics of forest management under risk." *Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Forest Economics*, No. 79.

Kyrklund, B. (1990). «Les forêts et la foresterie industrielle peuvent-elles faire baisser la teneur excessive de l'atmosphère en bioxyde de carbone.» *Unasylva*, 163: 12-14.

Morck, R., Schwartz, E. et Strangeland, D. (1989). "The valuation of forestry resources under stochastic prices and inventories." *Journal of Financial Quantitative Analysis*, 24: 473-487.

Nelson, D. B. et Ramaswamy, K. (1990). «Simple binomial processes as diffusion approximation in financial models». *Review of Financial Studies*, 3 (3):393-430.

Nordhaus, W.D.; Mendelsohn, R. et Shaw, D. (1994) «The impact of global warming on agriculture: A Ricardian analysis». *American Economic Review*, 84 (4): 753-772.

Nordhaus, W. (1991) « A sketch of the economics of the greenhouse effect». *American Economic Review, Papers and Proceedings*, 81 (2):146-150.

Norstrom, C.J. (1975). "A stochastic model for the growth period decision in forestry." *Swedish Journal of Economics*, 77: 329-337.

Pindyck, R.S. (1993). " A note on competitive investment under uncertainty". *American Economic Review*, 83: 273-277

Reed, J.W. et H.R. Clarke (1990) «Harvest decisions and asset valuation for biological resources exhibiting size-dependent stochastic growth » *International Economic Review*, 31 (1) : 147-169.

Sedjo, R. et Solomon, A. M. (1989). «Climate and the forests» in Rosenberg N.J. *Greenhouse Warming: Abatement and Adaptation*. Resources for the Future, Washington DC: 105-109.

Snyder, D.L. et Bhattacharyya, N.R.(1990). " A more general dynamic economic model of the optimal rotation of multiple-use forests." *Journal of Environmental Economics and Management*, 18(2), Part 1: 168-175.

Teeter, L.D. et J.P. Caulfield ((1991)."Stand density management strategies under risk : Effects of stochastic prices". *Canadian Journal of Forest Research*, 21: 1373-1379.

Thomson, T.A. (1992). "Optimal forest rotation when stumpage prices follow a diffusion process" *Land Economics*, 68 (3):329-342.

Van Kooten G.C. et al. (1995). "Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services". *American Journal of Agricultural Economics*, 77: 365-374.

Van Kooten, G.C. et al. (1992). "Potential to sequester carbon in Canadian forests: Some economic considerations. " *Canadian Public Policy*, 18 (2): 127-138.

Wilmott, P., Dewynne, J. et Howison, S. (1996). *The Mathematics of Financial Derivatives: A Student Introduction*. Cambridge University Press.

Wilmott, P., Dewynne, J. et Howison, S. (1993). *Option Pricing: Mathematical Models and Computation*. Oxford Financial Press.

Yin R. et Newman D.J. (1996). "The effect of catastrophic risk on forest investment decisions". *Journal of Environmental Economics and Management*, 31(2): 186-197.